

Pole elektromagnetyczne – źródła, regulacje i pomiary

Rafał Pawlak

W artykule przedstawiono podstawowe problemy związane ze środowiskiem elektromagnetycznym, naturalnymi i wytwarzanymi przez człowieka źródłami pola elektromagnetycznego (PEM). Następnie omówiono zagadnienia prawnej ochrony człowieka i środowiska przed PEM, zarówno na poziomie wymagań europejskich, jak i polskich. Scharakteryzowano wymagania zapisane w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. odnoszące się do wartości dopuszczalnych poziomów PEM w środowisku i metod sprawdzania dotrzymania tych poziomów, jednocześnie wskazując na istotne różnice w stosunku do unijnego zalecenia 1999/519/EC. Szczegółowo omówiono sposoby wykonywania pomiarów PEM w środowisku, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów selektywnych częstotliwościowo w dziedzinie kodowej. Na koniec zwrócono uwagę na problem wyznaczania poziomów PEM w sieciach 5G.

pole elektromagnetyczne (PEM), ochrona środowiska, ICNIRP, GSM, UMTS, LTE, 5G, SAR, zalecenie 1999/519/EC, ekspozycja na pole elektromagnetyczne, pomiary szerokopasmowe, pomiary selektywne

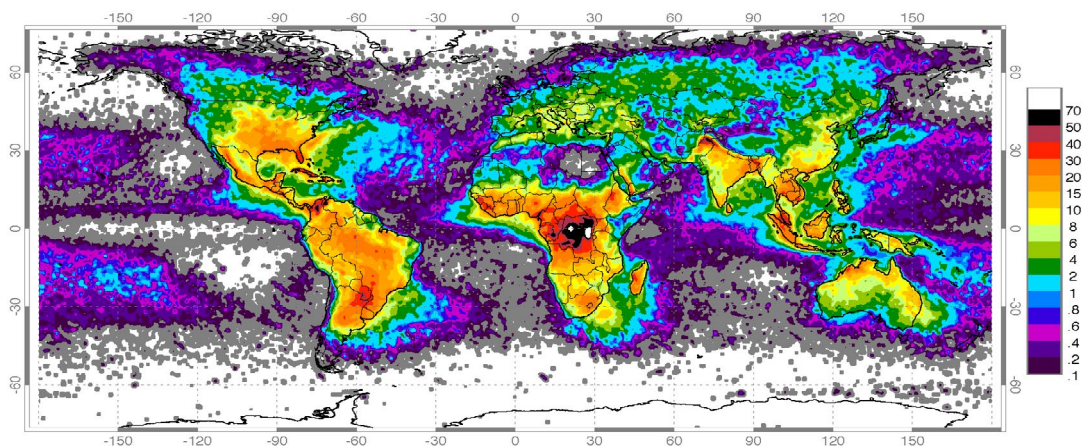
Człowiek w środowisku elektromagnetycznym

Zjawiska elektromagnetyczne są nierozzerwalnie związane z rozwijającym się na przestrzeni milionów lat wszechświatem. Należą do licznych, niezwykle istotnych i zasadniczych procesów, które tworzyły i tworzą nadal naturalne środowisko elektromagnetyczne Ziemi, stanowiąc jego integralną część. Warto zauważyć, że niejonizujące promieniowanie elektromagnetyczne występujące w formie pola elektromagnetycznego (PEM) istniało o wiele wcześniej niż na Ziemi pojawił się człowiek.

Naturalne środowisko elektromagnetyczne

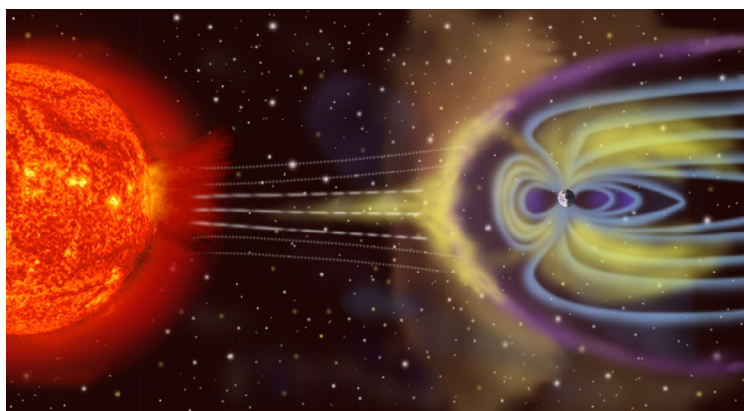
Źródłem naturalnego środowiska elektromagnetycznego, w którym człowiek żyje „od zawsze”, związanego z budową Ziemi i otaczającą ją atmosferą są: Słońce, Ziemia i zjawiska atmosferyczne. W tym zakresie mamy do czynienia:

- z naturalnym polem magnetycznym Ziemi, tzw. polem geomagnetycznym, którego wartość zależy od szerokości geograficznej [1], [2] (na obszarze Polski natężenie pola magnetycznego wynosi ~ 38 A/m),
- z naturalnym polem elektrycznym Ziemi, które jest efektem różnicy potencjałów pomiędzy jonosferą a ujemnie naładowaną powierzchnią Ziemi [1], [2] (typowa wartość natężenia pola elektrycznego to $100 \div 150$ V/m),
- z wyładowaniami elektrycznymi powstającymi np. w wyniku różnicy potencjałów pomiędzy chmurą a powierzchnią Ziemi [2], [3]. Na rys. 1 przedstawiono natężenie występowania wyładowań piorunowych na powierzchni 1 km^2 w ciągu roku.



Rys. 1. Natężenie występowania wyładowań piorunowych na powierzchni 1 km² w ciągu roku [3]

Źródłem naturalnego środowiska elektromagnetycznego są także różnego rodzaju zjawiska kosmiczne. Jak pokazano symbolicznie na rys. 2, jonosfera i magnetosfera, jako elementy atmosfery Ziemi, pełnią rolę naturalnej osłony chroniącej powierzchnię planety przed promieniowaniem elektromagnetycznym niepożądanym (np. przed wiatrem słonecznym [4]).



Rys. 2. Jonosfera i magnetosfera chroniące Ziemię przed działaniem wiatru słonecznego [4]

Jednocześnie, jonosfera i magnetosfera, nie stanowią jednak przeszkody dla promieniowania w zakresie od podczerwieni do nadfioletu [2] (w tym światła widzialnego), a także w zakresie częstotliwości radiowych. Jako ciekawostkę można podać, że wartość nasłonecznienia, czyli inaczej ujmując poziom gęstości mocy fal elektromagnetycznych w zakresie światła widzialnego, w słoneczny dzień, przy braku zachmurzenia przekracza wartość 600 W/m² [5].

Rozwój cywilizacyjny i sztuczne pole elektromagnetyczne

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym związanym ściśle z rozkwitem nauk technicznych, skutek działalności człowieka polegającej na wytwarzaniu i używaniu coraz większej liczby szeroko rozumianych

urządzeń elektrycznych, środowisko elektromagnetyczne wzbogaciło się o źródła inne niż naturalne, tzw. źródła sztucznego PEM [6]. Pierwsze źródła sztucznego PEM, skutkujące zaburzeniem naturalnego PEM, zostały wprowadzone do środowiska stosunkowo niedawno, bo zaledwie niewiele ponad 100 lat temu. Można zaryzykować stwierdzenie, że aktualny stan rozwoju technicznego kształtującego de facto poziomy PEM jest bezpośrednią pochodną prac prowadzonych na przełomie XIX i XX wieku przez Nikola Teslę nad wynalezieniem transformatora, opracowaniem techniki prądu przemiennego czy związanych z przesyłaniem i odbieraniem fal elektromagnetycznych. Oczywiście mocny fundament naukowy w tej dziedzinie zbudowali wcześniej m.in. Georg Ohm, Gustav Robert Kirchhoff, Michael Faraday czy James Clerk Maxwell.

Codziennie, mniej lub bardziej świadomie, korzystamy z energii elektrycznej, a dokładniej – z różnego rodzaju urządzeń, które są odbiornikami tej energii. Należy pamiętać, że każde urządzenie zasilane energią elektryczną wytwarza PEM niezależnie od tego, czy jest to efekt pożądaný (np. telefon komórkowy), czy uboczny (np. elektryczny sprzęt powszechnego użytku taki jak odkurzacz lub komputer). Energia elektryczna jest dostarczana do odbiorców, w tym do naszych domów, poprzez rozległą sieć elektroenergetyczną, która także stanowi źródło sztucznego PEM. Jednak dominującym źródłem PEM tego typu pozostają bez wątpienia wszelkiego rodzaju urządzenia, które w sposób celowy to pole wytwarzają: radiowe i telewizyjne stacje nadawcze, stacje przeznaczone do radionawigacji i radiolokacji, stacje bazowe radiokomunikacji ruchomej, telefony komórkowe, radiotelefony do łączności analogowej i cyfrowej, radiostacje amatorskie, kuchenki mikrofalowe, urządzenia wyposażone w interfejsy Wi-Fi, Bluetooth, urządzenia IoT, urządzenia bliskiego zasięgu ogólnego stosowania takie jak np. pilot zdalnego sterowania zamkiem centralnym w samochodzie, i wiele, wiele innych.

PEM wytwarzane przez wiele różnych źródeł, w bardzo szerokim zakresie częstotliwości (od kilkudziesięciu Hz do kilkudziesięciu GHz) i o niezwykle zróżnicowanym poziomie (od μW do kilkunastu MW), rozchodzące się w formie fal elektromagnetycznych podlega doskonale znanym prawom fizyki, takim jak interferencja, ugięcie czy odbicie. W efekcie tego mamy do czynienia ze zmiennym w czasie sztucznym PEM, które np. ze względu na rodzaj pracy systemów cyfrowych takich jak UMTS czy LTE (moc nadajników doprowadzona do anten jest zależna od obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym) ma charakter stochastyczny, a nie deterministyczny.

Prawna ochrona człowieka i środowiska przed PEM

Rozwojowi urządzeń wytwarzających sztuczne PEM towarzyszy rozwój przepisów prawa tworzonych w celu ochrony ludzi i środowiska przed tym polem. W Polsce pierwszy przepis prawa w tym zakresie, aczkolwiek odnoszący się wyłącznie do ekspozycji zawodowej, a nie do ogółu ludności, został opracowany jeszcze w pierwszej połowie lat 60. XX wieku [6], [7]. Było to Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 20 sierpnia 1963 r. w sprawie warunków zdrowia wymaganych od pracowników narażonych na działanie pola elektromagnetycznego mikrofal. Natomiast pierwszym przepisem prawa odnoszącym się do ochrony ludzi i środowiska przed tym polem elektromagnetycznym było rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 listopada 1980 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym szkodliwym dla ludzi i środowiska.

W związku z lawinowo rosnącą liczbą powszechnie dostępnych urządzeń radiowych wytwarzających PEM, a zwłaszcza z upowszechnieniem telefonów komórkowych i rozwojem sieci GSM związanym

z pojawieniem się stacji bazowych wyposażonych w anteny nadawczo-odbiorcze, nastąpił wzrost rangi zagadnień związanych z ochroną ludzi i środowiska przed wpływem PEM. Na początku lat 90. XX wieku Światowa Organizacja Zdrowia (*World Health Organization* — WHO) podjęła prace badawcze w zakresie biologicznych skutków oddziaływania fal o częstotliwościach radiowych. W 1998 r. Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* — ICNIRP) we współpracy z WHO, określiła wytyczne [8] dotyczące ograniczenia narażenia na PEM o częstotliwości do 300 GHz, mające zapewnić ochronę przed znanymi niekorzystnymi efektami zdrowotnymi. Na podstawie tych wytycznych opracowano zalecenie Rady Europejskiej z dnia 12 lipca 1999 r. [9] w sprawie ograniczania ekspozycji ludności w polu elektromagnetycznym o częstotliwościach od 0 Hz do 300 GHz (1999/519/EC), które jest traktowane, jako podstawowy akt Unii Europejskiej odnoszący się do ochrony ludności przed PEM.

Zalecenie 1999/519/EC – akt Unii Europejskiej

W zaleceniu 1999/519/EC [9] zdefiniowano dwie wielkości: ograniczenia podstawowe (*Basic restrictions*) odnoszące się do zjawisk bezpośrednio występujących w organizmach ludzi oraz poziomy odniesienia (*Reference levels*) określone ze względu na potrzeby praktycznej oceny (czyli pomiaru) ryzyka przekroczenia ograniczeń podstawowych ekspozycji na PEM w środowisku.

W zakresie częstotliwości radiowych od 10 MHz do 10 GHz ograniczenia podstawowe określone są poprzez współczynnik SAR (*Specific Absorption Rate*) wyrażany w [W/kg], który jest miarą tempa pochłaniania energii elektromagnetycznej zamienianej w tkankach organizmu człowieka na ciepło, a w praktyce oznacza moc pochłanianą przez jednostkę masy ciała. Ustalono następujące wartości graniczne SAR, uśredniane w ciągu 6 minut:

- dla całego ciała człowieka – wartość uśredniona: 0,08 W/kg,
- dla narażenia miejscowego – głowa i tułów: 2 W/kg,
- dla narażenia miejscowego – kończyny: 4 W/kg.

Wartość graniczna SAR = 0,08 W/kg, uśredniona dla całego ciała człowieka, została określona z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa o wartości 50. Skąd taka wartość? Jako odniesienie przyjęto wartość SAR = 4 W/kg uśrednianą w ciągu 6 minut, wskazaną w zaleceniu ICNIRP [8], skutkującą możliwym efektem termicznym polegającym na przyroście temperatury ciała nie więcej niż o 1°C. Następnie przyjęto 10-krotny współczynnik bezpieczeństwa, uzyskując w ten sposób wartość SAR dopuszczalną dla ekspozycji zawodowej i zapewniającą wystarczająco duży margines bezpieczeństwa:

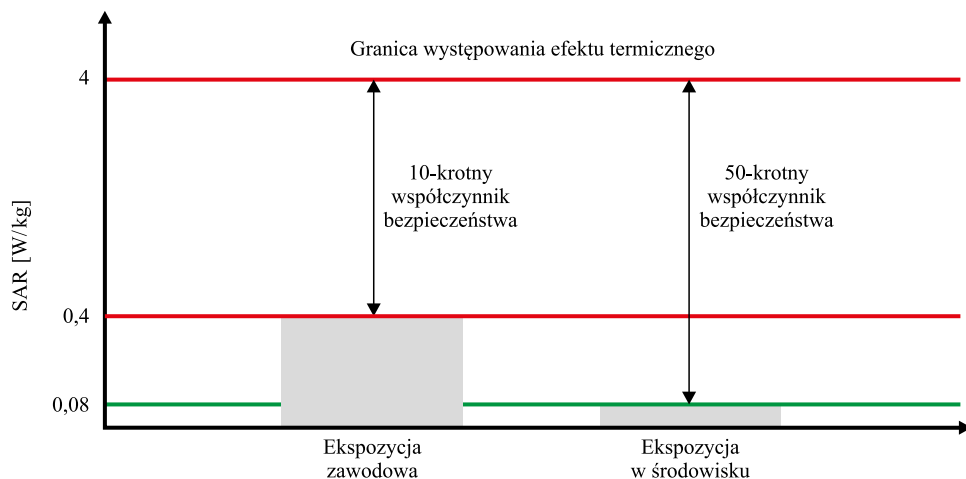
$$\text{SAR} = 0,1 \times 4 \text{ W/kg} = 0,4 \text{ W/kg.}$$

Dalej, przyjęto jeszcze 5-krotny współczynnik bezpieczeństwa, uzyskując w ten sposób wartość SAR dopuszczalną dla ciągłej ekspozycji środowiskowej:

$$\text{SAR} = 0,2 \times 0,4 \text{ W/kg} = 0,08 \text{ W/kg.}$$

Ostatecznie współczynnik bezpieczeństwa, którego miarą jest wartość SAR skutkująca możliwym wzrostem temperatury ciała nie więcej niż o 1°C odniesiona do średniej wartości SAR dla całego ciała człowieka, wynosi $4 / 0,08 = 50$. Porównanie dopuszczalnej wartości współczynnika SAR dla ekspozycji

zycji zawodowej (0,4 W/kg) i ekspozycji w środowisku (0,08 W/kg) z wartością graniczną występowania efektu termicznego (4 W/kg) oraz związane z tym współczynniki bezpieczeństwa przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Porównanie dopuszczalnej wartości współczynnika SAR dla ekspozycji zawodowej oraz ekspozycji w środowisku z wartością graniczną występowania efektu termicznego – współczynniki bezpieczeństwa

Poziomy odniesienia są ściśle związane z ograniczeniami podstawowymi. Zostały wyznaczone w taki sposób, że niezależnie od czasu przebywania w obszarze, w którym dotrzymane są wymagania określone dla poziomów odniesienia, skutki ekspozycji na PEM nie przekroczą ograniczeń podstawowych. Inaczej ujmując: jeśli nie wystąpi przekroczenie poziomu odniesienia, to z całą pewnością nie wystąpi także przekroczenie ograniczenia podstawowego [9]. Poziomy odniesienia w zakresie częstotliwości radiowych określone są poprzez wielkości mierzalne, m.in.: wartość skuteczną natężenia składowej elektrycznej pola E wyrażaną w [V/m] oraz wartość gęstości mocy S wyrażaną w [W/m²]. Ustalono następujące poziomy odniesienia, wyrażone jako wartości graniczne natężenia składowej elektrycznej pola E oraz gęstości mocy S , zależnie od zakresu częstotliwości radiowych:

- od 10 MHz do 400 MHz: $E = 28$ V/m oraz $S = 2$ W/m²,
- od 400 MHz do 2000 MHz: $E = 1,375 \times f^{1/2}$ V/m oraz $S = f/200$ W/m²,
- od 2 GHz do 300 GHz: $E = 61$ V/m oraz $S = 10$ W/m².

Należy podkreślić, że ww. wartości graniczne odnoszą się do wyników pomiarów PEM uśrednianych w okresie 6 minut.

Dla częstotliwości, w których pracują typowe stacje bazowe sieci komórkowych, można zatem określić poziomy odniesienia przedstawione w tablicy 1.

Tabl. 1. Poziomy odniesienia: natężenie pola E oraz gęstości mocy S dla typowych częstotliwości stosowanych w sieciach komórkowych, określone na podstawie zalecenia 1999/519/EC

Poziom odniesienia	Częstotliwość [MHz]				
	800	900	1800	2100	2600
Natężenie pola E [V/m]	38,9	41,3	58,3	61,0	61,0
Gęstość mocy S [W/m ²]	4,0	4,5	9,0	10,0	10,0

Prawo Ochrony Środowiska – przepisy krajowe

Zalecenie 1999/519/EC [9] jako zbiór wytycznych, stało się podstawą do określenia granicznych wartości poziomów PEM w środowisku w przepisach krajowych państw członkowskich Unii Europejskiej. Należy zauważyć [9], [10], że państwa członkowskie, odpowiadając za ochronę swoich obywateli, mogą ustanawiać własne – bardziej rygorystyczne – ograniczenia niż zdefiniowane w zaleceniu 1999/519/EC [9]. W związku z tym, w 17 państwach członkowskich dopuszczalne poziomy PEM w środowisku ustalono zgodnie z zaleceniem 1999/519/EC [9], a w 9 państwach członkowskich, m.in. w Polsce, przyjęto własne uregulowania prawne w zakresie ochrony środowiska przed oddziaływaniem PEM.

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo Ochrony Środowiska [11], która do dziś stanowi zbiór podstawowych przepisów prawa regulujących zasady ochrony środowiska przed polami elektromagnetycznymi, została uchwalona w niespełna dwa lata po przyjęciu zalecenia 1999/519/EC [9]. Zgodnie z zapisami art. 121 Ustawy [11] dotrzymanie dopuszczalnych poziomów PEM jest wymagane bezwzględnie, przy czym delegacja ustawowa do wydania właściwego przepisu wykonawczego określającego te poziomy oraz sposoby sprawdzania ich dotrzymania znajduje się w art. 122 Ustawy [11]. Tym przepisem wykonawczym jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów [12]. W tablicy 2 przedstawionej w załączniku nr 1 do rozporządzenia [12] z dnia 30 października 2003 r. ustalono dopuszczalne poziomy PEM w środowisku w miejscach dostępnych dla ludności, które w sensie merytorycznym odpowiadają wartościom granicznym zdefiniowanym w zaleceniu 1999/519/EC [9]. Przez miejsca dostępne dla ludności, zgodnie z art. 124 Ustawy [11], rozumie się wszelkie miejsca, z wyjątkiem tych miejsc, do których dostęp ludności jest zabroniony lub niemożliwy bez użycia sprzętu technicznego. Dopuszczalne poziomy PEM w środowisku są wyrażone poprzez wartość skuteczną natężenia składowej elektrycznej pola E wyrażoną w [V/m] oraz gęstość mocy S wyrażaną w [W/m²], zależnie od zakresu częstotliwości radiowych:

- od 3 MHz do 300 MHz: $E = 7$ V/m,
- od 300 MHz do 300 GHz: $E = 7$ V/m lub $S = 0,1$ W/m².

Dla częstotliwości, w których pracują typowe stacje bazowe sieci komórkowych, można zatem określić poziomy dopuszczalne przedstawione w tabl. 2.

Tabl. 2. Wartości dopuszczalne: natężenie pola E oraz gęstość mocy S dla typowych częstotliwości stosowanych w sieciach komórkowych, określone na podstawie rozporządzenia z dnia 30 października 2003 r.

Wartość dopuszczalna	Częstotliwość [MHz]				
	800	900	1800	2100	2600
Natężenie pola E [V/m]	7,0				
Gęstość mocy S [W/m ²]	0,1				

Metody wyznaczania PEM określono w załączniku nr 2 do rozporządzenia [12] z dnia 30 października 2003 r. Zaznaczono, że pomiary w otoczeniu instalacji radiokomunikacyjnych należy wykonać podczas pracy wszystkich urządzeń wytwarzających PEM w danym zakresie częstotliwości, w warunkach odpowiadających charakterystykom eksploatacyjnym tych urządzeń; w przypadku możliwości eksploatacji w kilku rodzajach pracy – pomiary należy wykonać przy tym rodzaju pracy, przy którym występują PEM o najwyższym poziomie. Natomiast ostateczny wynik pomiaru powinien zawierać poprawki pomiarowe uwzględniające parametry pracy instalacji wytwarzających PEM, najbardziej niekorzystne z punktu widzenia oddziaływania na środowisko. Wskazano także, że pomiary przeprowadza się w pionach i punktach pomiarowych, wzdłuż głównych i pomocniczych kierunków pomiarowych, a także na balkonach i tarasach, na których mogą przebywać ludzie oraz w budynkach – w środku pomieszczeń oraz w płaszczyźnie otworów okiennych znajdujących się od strony źródła PEM. Ustalono, że pomiary w otoczeniu instalacji radiokomunikacyjnych, w przyjętych pionach pomiarowych, należy wykonać na wysokościach od 0,3 do 2 m nad powierzchnią ziemi albo nad innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie (nad poziomem podłogi w przypadku pomiarów w budynkach), przyjmując za wynik pomiaru maksymalny, zmierzony w danym pionie poziom PEM.

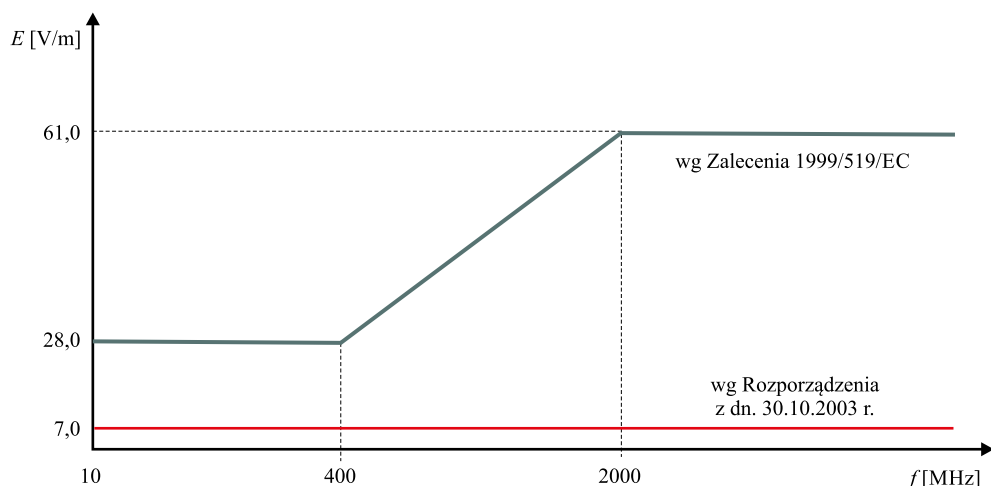
Rozporządzenie z dnia 30 października 2003 r. a zalecenie 1999/519/EC

Porównując, w odpowiednich zakresach częstotliwości radiowych, wartości dopuszczalne ustalone w rozporządzeniu [12] z dnia 30 października 2003 r. z poziomami odniesienia ustalonymi w zaleceniu 1999/519/EC [9] (np. natężenie pola E), można stwierdzić, że krajowe przepisy ochrony środowiska przed PEM są znacznie bardziej surowe niż wymagania europejskie. Porównanie, wyrażone jako natężenie pola E , wartości dopuszczalnej ustalonej w rozporządzeniu [12] z poziomem odniesienia ustalonym w zaleceniu 1999/519/EC [9], przedstawiono na rys. 4.

Warto zauważyć także, że podobne wartości graniczne PEM jak obowiązujące w Polsce, są stosowane nadal jedynie w Bułgarii czy we Włoszech, natomiast np. na Litwie w 2016 r. podniesiono limit gęstości mocy z 0,1 W/m² na 1 W/m² [13].

Ze źródeł normatywnych [14] wynika, że uśrednianie wyników pomiarów zapewnia lepszą ocenę ekspozycji całego ciała człowieka na PEM ze względu na ilość absorbowanej energii w.cz., gdyż pozwala np. uwzględnić występowanie zaników szybkozmiennych wywołanych przez niekoherentne sumowanie sygnałów docierających do ciała człowieka różnymi drogami. Jednakże, zgodnie z rozporządzeniem [12] z dnia 30 października 2003 r., a w odróżnieniu do postanowień zalecenia 1999/519/EC [9], nie stosuje się uśredniania wyników pomiarów PEM, ani w czasie (krótkookresowego w czasie

6 minut czy długookresowego), ani w przestrzeni. Tym samym ograniczenia nałożone w Polsce na maksymalne poziomy pól elektromagnetycznych o częstotliwości radiowej, wytwarzanych przez instalacje radiokomunikacyjne, np. przez urządzenia stacji bazowych sieci komórkowych, co do wartości i sposobu wyznaczania – są wielokrotnie ostrzejsze niż określone w zaleceniu 1999/519/EC [9] i przyjęte do bezpośredniego stosowania w wielu państwach członkowskich Unii Europejskiej.



Rys. 4. Porównanie wartości dopuszczalnej ustalonej w rozporządzeniu z dnia 30 października 2003 r. z poziomem odniesienia ustalonym w zaleceniu 1999/519/EC – natężenie pola E

Pomiary PEM w środowisku

Zgodnie z zapisami załącznika nr 2 do rozporządzenia [12] z dnia 30 października 2003 r., sprawdzenie dotrzymania dopuszczalnych poziomów PEM w środowisku następuje poprzez wykonanie pomiarów poziomów tych pól, a następnie porównanie otrzymanych wyników z odpowiednimi wartościami dopuszczalnymi. Oznacza to, że ochrona środowiska, w tym człowieka, przed oddziaływaniem PEM jest realizowana przez weryfikację (czyli pomiar) PEM występujących w środowisku. Przy czym art. 147a Ustawy [11] wprowadza obowiązek wykonywania m.in. pomiarów PEM w środowisku przez laboratoria akredytowane, nad którymi nadzór w Polsce pełni Polskie Centrum Akredytacji (PCA).

Pomiary szerokopasmowe i selektywne

Powszechnie stosowana metoda pomiaru szerokopasmowego [15] w otoczeniu stacji bazowej, z wykorzystaniem miernika natężenia pola połączonego z szerokopasmową anteną pomiarową, umożliwia m.in. wyznaczenie wartości skutecznej natężenia składowej elektrycznej pola. Na wynik pomiaru szerokopasmowego w istocie składają się wszystkie sygnały odbierane przez antenę pomiarową w zakresie częstotliwości określonym przez jej konstrukcję, lecz identyfikacja częstotliwości składowych mierzonych pól nie jest możliwa. Zastosowanie bardziej zaawansowanego przyrządu, pozwalającego na wykonywanie pomiarów selektywnych w dziedzinie częstotliwości, umożliwia wyznaczenie wartości natężenia pola w precyzyjnie określonym zakresie częstotliwości. Poprawia to

sytuację odnośnie identyfikacji częstotliwości składowych mierzonych pól – w tym np. identyfikację sieci, w której pracuje stacja wytwarzająca pole. Uzyskane wyniki pomiarów, zarówno szerokopasmowych jak i selektywnych częstotliwościowo, odzwierciedlają wartości natężenia pola elektrycznego występującego w otoczeniu stacji bazowej w trakcie jej normalnej pracy.

Wraz z rozwojem usług w sieciach radiokomunikacyjnych zmieniają się techniki nadawania sygnałów radiowych. W przypadku radiokomunikacyjnych systemów cyfrowych takich jak UMTS i LTE moc nadajników doprowadzona do anten stacji bazowych jest zależna od obciążenia stacji bazowej ruchem telekomunikacyjnym generowanym przez użytkowników [19], a więc jest po pierwsze zmienna w czasie, a po drugie – zmienność ta ma charakter losowy. Skutkuje to tym, że rozkład natężenia PEM w otoczeniu stacji bazowej wykracza poza model deterministyczny. Może być natomiast opisywany probabilistycznie narzędziami właściwymi dla statystyki matematycznej. W rzeczywistości więc, zależnie od chwilowego obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym, wartości natężenia pola zmieniają się w czasie [17], [18]. Wyniki pomiarów zarówno szerokopasmowych, jak i selektywnych częstotliwościowo wprost nie stanowią podstawy do określenia wartości skutecznej natężenia składowej elektrycznej pola w warunkach maksymalnego obciążenia stacji bazowej [19].

W związku z tym, aby spełnić wymagania metody wyznaczania PEM opisane w załączniku nr 2 do rozporządzenia [12] z dnia 30 października 2003 r., należałoby uwzględnić poprawki pomiarowe umożliwiające ekstrapolację uzyskanych wyników pomiarów do wartości równoważnych tym, które odpowiadałyby pracy stacji bazowej w warunkach najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko. O sposobie wyznaczania poprawek pomiarowych rozporządzenie [12] z dnia 30 października 2003 r. milczy.

Skutkuje to koniecznością stosowania norm technicznych zawierających szczegółowe postanowienia, które pozwalają ustalić wymagania, jakie powinny być stosowane podczas wyznaczania poziomów PEM w otoczeniu instalacji radiokomunikacyjnych, w tym stacji bazowych, tak aby możliwe było spełnienie postanowień zawartych w rozporządzeniu [12] z dnia 30 października 2003 r. Od strony formalnej zostało to usankcjonowane wydanym przez PCA w 2017 r. programem DAB-18 [16] odnoszącym się do akredytacji laboratoriów badawczych wykonujących pomiary PEM w środowisku. W programie DAB-18 [16] zapisano, że dla pomiarów PEM wykonywanych w środowisku, laboratorium, przede wszystkim, powinno stosować metody pomiarowe opisane w rozporządzeniu [12] z dnia 30 października 2003 r., a ponadto zaleca się stosowanie szeregu norm technicznych, odpowiednich do zakresu wykonywanych badań. Przykładem może być tu norma PN-EN 62232:2018-01 [14]. W normie tej opisano m.in. metody ekstrapolacji wyników do warunków największego ruchu w sieci dla różnych systemów, w tym UMTS i LTE, które znajdują praktyczne zastosowanie podczas pomiarów selektywnych częstotliwościowo w dziedzinie kodowej.

Pomiary selektywne częstotliwościowo w dziedzinie kodowej

Metoda selektywnego w dziedzinie kodowej pomiaru natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez anteny stacji UMTS polega na [19] zastosowaniu przyrządu pomiarowego, który po dostrojeniu do częstotliwości badanego kanału radiowego UMTS dekoduje sygnały P-CPICH (*Primary Code of the Common Pilot Channel*), wykonuje pomiary poziomu tych sygnałów oraz identyfikuje sektory/komórki, które nadają zmierzone sygnały. Następnie, na podstawie przyjętego współczynnika określającego stosunek mocy składowej P-CPICH do maksymalnej możliwej mocy nadajnika UMTS, przyrząd umożliwia estymację poziomu PEM w warunkach największego ruchu.

Metody selektywnego w dziedzinie kodowej pomiaru natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez anteny stacji LTE polegają na [19] zastosowaniu przyrządu, który po dostrojeniu do znamionowej częstotliwości badanego kanału radiowego LTE, dekoduje poszczególne sygnały odniesienia CRS (*Cell-specific Reference Signals*), wykonuje pomiary poziomu tych sygnałów oraz identyfikuje aktywne porty antenowe, które nadają zmierzone sygnały. Następnie, na podstawie przyjętego współczynnika określającego stosunek mocy przypadającej na mierzony sygnał odniesienia CRS do maksymalnej mocy promieniowanej łącznie przez wszystkie porty antenowe stacji LTE, przyrząd umożliwia estymację poziomu PEM w warunkach największego ruchu.

Wyniki pomiarów uzyskane podczas pomiarów selektywnych częstotliwościowo w dziedzinie kodowej odnoszą się zatem do teoretycznej sytuacji maksymalnego obciążenia stacji bazowej ruchem telekomunikacyjnym, a więc jednoczesnego wykorzystania wszystkich zasobów stacji: wszystkie dostępne systemy we wszystkich dostępnych pasmach częstotliwości i równocześnie praca z maksymalną mocą. W praktyce, z uwagi na zaawansowane algorytmy dynamicznej alokacji zasobów, prawdopodobieństwo wystąpienia takiej sytuacji jest bliskie zeru. Z jednej strony można zatem mówić o przeszacowaniu wyników pomiarów, z drugiej jednak – należy mieć na uwadze wymagania rozporządzenia [12] z dnia 30 października 2003 r. odnośnie wykonywania pomiarów podczas pracy stacji bazowej w warunkach najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko.

PEM i sieci 5G

Planowane w najbliższych latach wdrożenie sieci 5G ma przynieść znaczny wzrost prędkości transmisji danych (do 20 GB/s wg wstępnej specyfikacji ITU) oraz zmniejszenie opóźnień do pojedynczych milisekund. Zapotrzebowanie na pasmo wymagane do tak szybkiej transmisji danych będzie wiązało się z koniecznością wykorzystania nowych zasobów częstotliwości, rzędu kilkudziesięciu GHz, a to w efekcie spowoduje lawinowy wzrost liczby stacji bazowych tworzących tzw. *small cells* o promieniu ok. 200 m. Wymagana równoczesna obsługa kilku tysięcy urządzeń oraz zapewnienie wysokiej niezawodności łączy radiowych poprzez unikanie interferencji wymuszają wykorzystanie techniki Massive MIMO [20] umożliwiającej jednoczesne wysyłanie i odbiór z matrycy antenowej zbudowanej z ponad kilkudziesięciu lub nawet kilkuset anten. Jednocześnie, nowoczesne techniki modulacji i kodowania oraz możliwość przestrzennego formowania i kierowania wielu różnych wiązek antenowych (*3D beamforming*) od stacji bazowych do anten urządzeń poszczególnych użytkowników, pozwolą na zredukowanie mocy dostarczanych do anten tych stacji [20]. Wdrożenie sieci 5G przyniesie z pewnością jeszcze jeden wymierny skutek – będzie nim rewizja aktualnego podejścia połączone z opracowaniem nowych metod wyznaczania pól elektromagnetycznych. Także w Polsce.

Bibliografia

- [1] Rochalska M.: *Wpływ pól elektromagnetycznych na organizmy żywe: rośliny, ptaki i zwierzęta*, Medycyna Pracy, 2007, nr 58(1), s. 37-48.
- [2] Białaszewski P.: *Pola elektromagnetyczne w środowisku – opis źródeł i wyniki badań*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, sierpień 2007.
- [3] Distribution of lightning, http://en.wikipedia.org/wiki/Distribution_of_lightning
- [4] Magnetosphere, <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetosphere>

- [5] Stacja Meteo Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, <http://www.if.pw.edu.pl/~meteo>
- [6] Aniołczyk H.: *Krajowy system ochrony przez polami elektromagnetycznymi 0 Hz–300 GHz w świetle aktualnych uwarunkowań prawnych*, Medycyna Pracy, 2006, nr 57(2), s. 151-159.
- [7] Różycki S.: *Wymagania przepisów dotyczących ochrony człowieka przed polami elektromagnetycznymi występującymi w środowisku*, Medycyna Pracy, 2006, nr 57(2), s. 193-199.
- [8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Physics, nr 74, s. 494-522, 1998.
- [9] *Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*, 1999/519/EC, Official Journal of the European Communities, L199/59, 1999.
- [10] *Report on the implementation of the Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz) (1999/519/EC) in the EU Member States*, Release 2.1, Brussels, Project Number SI2.489570-SANCO/2007/C7/06, European Commission, 8 May 2008.
- [11] *Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska*, Dz. U. Nr 62 poz. 627 (z późn. zm.).
- [12] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów*, Dz. U. Nr 192 poz. 1883.
- [13] *Odpowiedź na interpelację nr 19031 w sprawie zmiany przepisów regulujących budowę stacji bazowych telefonii komórkowej*, Minister Cyfryzacji, BM-WOP.072.20.2018, 9 marca 2018 r.
- [14] PN-EN 62232:2018-01, Wyznaczanie natężenia pola RF, gęstości mocy i SAR w otoczeniu radiokomunikacyjnych stacji bazowych dla oceny poziomu ekspozycji człowieka.
- [15] *Recommendation ITU-T K.83. Monitoring field strengths of electromagnetic fields*, International Telecommunication Union, Series K: Protections Against Interference, 03/2011.
- [16] *Program akredytacji laboratoriów badawczych wykonujących pomiary pola elektromagnetycznego w środowisku DAB-18*, Wydanie 1, Polskie Centrum Akredytacji, Warszawa, 2.02.2017 r.
- [17] *Basis for a UMTS measurement recommendation*, Project 08R2-HFumts, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Dipartimento Tecnologie Innovative, Alta Frequenza, 30 April 2004.

- [18] *Technical Report: Measurement Method for LTE Base Stations*, METAS-Report Nr 2012-218-808, Federal Office of Metrology METAS, Section Electricity, May 3, 2012.
- [19] *Pilotażowe badania i analizy dotyczące dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych (PEM)*, zał. 1. Metodyka pomiarów, Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, grudzień 2016 r.
- [20] *5G technology and human exposure to RF EMF*, Supplement 9, International Telecommunication Union, Series K: Protections Against Interference, 11/2017.

Rafał Pawlak

Rafał Pawlak ukończył w 2002 r. Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, uzyskując stopień magistra inżyniera w specjalności telekomunikacji – radiokomunikacji i radiolokacji. Pracownik Instytutu Łączności w Warszawie od 2001 r. Główny specjalista w Zakładzie Badań Systemów i Urządzeń. Prowadzi badania urządzeń radiowych z wymaganiami zasadniczymi wg dyrektyw 2014/53/UE (RED) oraz 2014/30/UE (EMCD). Zaangażowany w prace związane z pomiarami pól elektromagnetycznych.

e-mail: r.pawlak@itl.waw.pl